УДК 621.317.1

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОКОВ (НАПРЯЖЕНИЙ) В ОДНОФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ С ПОМОЩЬЮ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Е.И. Гольдштейн, А.О. Сулайманов, Н.Л. Бацева

Томский политехнический университет
E-mail: sao@tpu.ru

Обобщаются результаты исследований по разработке процедур определения спектральных портретов многочастотных сигналов с помощью вольт-амперных характеристик. Площадь вольт-амперной характеристики исходного и опорного сигналов минимальна при совпадении частот этих сигналов, а при совпадении фаз площадь стремится к нулю.

1. Общие соображения

Широкое использование в энергосистемах цифровых регистраторов аварийных событий объясняет большой интерес к теории и практике анализа установившихся процессов в одно- и трехфазных цепях по исходным данным в виде цифровых массивов мгновенных значений токов и напряжений.

Использование геометрической трактовки реактивной мощности Q позволило профессору О.А. Маевскому получить связь этой мощности с площадью вольт-амперной характеристики (ВАХ) F_{BAX} [1]:

$$Q = \pm \frac{1}{2\pi} F_{BAX}, \qquad (1)$$

где знак «+» соответствует перемещению рабочей точки по ВАХ против часовой стрелки (индуктивная нагрузка); знак «–» соответствует емкостной нагрузке.

В [2] показана целесообразность использования формулы (1) в виде

$$Q = \pm \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{N} [u(t_j) - u(t_{j+1})] \cdot [i(t_j) + i(t_{j+1})]. \qquad (2)$$

Здесь: $i(t_j)$, $i(t_{j+1})$, $u(t_j)$, $u(t_{j+1})$ – отсчеты мгновенных значений тока и напряжения в моменты времени t_j, $t_{j+1}=t_j+\Delta t$, $t_{j+2}=t_{j+1}+\Delta t$...; Δt – шаг дискретизации; T – период сигнала; $N=T/\Delta t$ – число разбиений на периоде сигнала.

Заслуживает внимания тот факт, что при расчетах по формуле (2) принципиально не учитывается взаимодействие разных по частоте гармоник тока и напряжения, поэтому формулы (1, 2) могут быть использованы для спектрального анализа.

В приведенных ниже результатах исследований будем использовать обозначения, принятые для точечного исчисления. Расчетные формулы примут вид:

- для действующих значений тока и напряжения

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \left\| i^2(t_j) \right\|_{j=1}^{N}}; \quad U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \left\| u^2(t_j) \right\|_{j=1}^{N}};$$

- для активной и реактивной мощностей

$$P = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \left\| p(t_j) \right\|_{j=1}^{N} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \left\| u(t_j)\, i(t_j) \right\|_{j=1}^{N};$$

$$Q = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^{N} \left\| [u(t_j) - u(t_{j+1})][i(t_j) + i(t_{j+1})] \right\|_{j=1}^{N}.$$

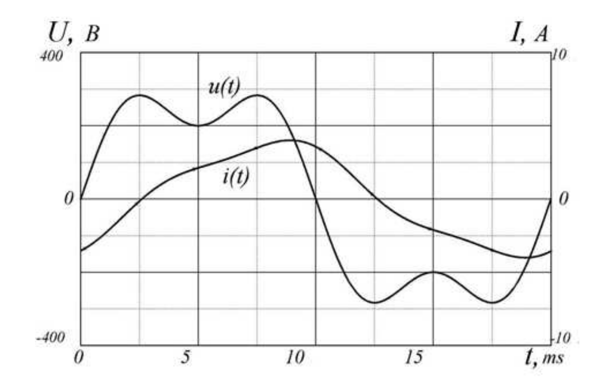
2. Определение реактивной мощности сдвига в однофазных цепях

На рис. 1 показаны графики тока и напряжения, а также ВАХ для случая:

$$u(t_j) = u_1(t_j) + u_2(t_j) = 300 \sin \omega t_j + 100 \sin 3\omega t_j;$$

$$i(t_j) = i_1(t_j) + i_2(t_j) =$$

$$= 3{,}8 \sin(\omega t_j - 54^\circ) + 0{,}513 \sin(3\omega t_j - 75{,}1^\circ).$$



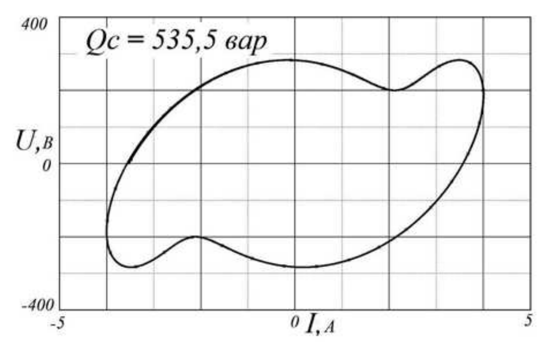


Рис. 1. *Графики $u(t_j)$, $i(t_j)$ и ВАХ $i(u)$ для однофазной цепи*

Легко видеть, что $Q_{C\Sigma}=Q_C^a+Q_C^б=535{,}46$ вар, тогда как мощности сдвига, обусловленные взаимодействием разных по частоте гармоник тока и напряжения, равны нулю $Q_C^в+Q_C^г=0$.

3. Спектральный анализ многочастотных сигналов с помощью вольт-амперных характеристик

В ходе детального исследования методики расчета реактивной мощности по ВАХ была выявлена возможность проведения на ее основе спектрального анализа многочастотного сигнала $a(t_j)$ с помощью опорного одночастотного сигнала $b(t_j)$ [5]:

$$a(t_j) = \sum_{k=1}^{\infty} A_{mk} \sin(\omega_k t_j + \varphi_k);$$

$$b(t_j) = B_m \sin(\omega_0 t_j + \varphi_0),$$

здесь: A_{mk}, ω_k, φ_k – амплитуда, круговая частота и фаза k-ой гармоники исследуемого сигнала; ω_0=var, φ_0=var – частота и фаза опорного сигнала.

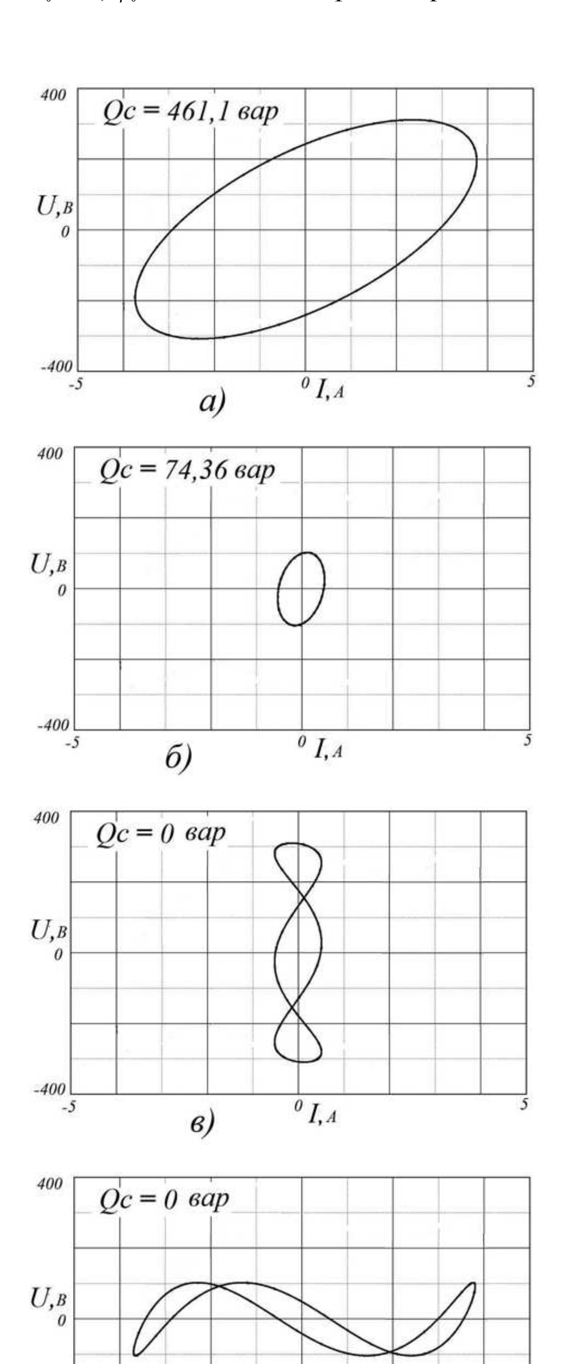


Рис. 2. *ВАХ (при N=1000) для случаев: а) $u_1(t_j)$ и $i_1(t_j)$; б) $u_2(t_j)$ и $i_2(t_j)$; в) $u_1(t_j)$ и $i_2(t_j)$; г) $u_2(t_j)$ и $i_1(t_j)$*

Для примера в таблице приведены ВАХ для случая, когда в сигнале имеется составляющая частотой ω_k=314,159 рад/с (f_k=50 Гц) при фазе φ_k=0 и амплитуде A_{mk}=320 В.

Изменяя значения частоты и фазы опорного сигнала и контролируя площадь ВАХ, находим $F_{BAX\,min}$: $f_0=f_k$ при $\varphi_0=\varphi_k$.

Таблица. *Процедура поиска частоты анализируемого сигнала*

f_0, Гц	φ_0, град	$F_{BAX\,min}$	Вид ВАХ
49	0	6243,51	
	120	82820,69	
	180	−6243,51	
50	0	$6{,}21 \cdot 10^{-12}$	
	120	87048,05	
	180	$4{,}1 \cdot 10^{-5}$	
	90	100514	

Как видно из таблицы, в случае, когда опорный сигнал $b(t_j)$ не совпадает по частоте с анализируемым сигналом, ВАХ получается не замкнутой. При совпадении частот ВАХ замкнута, либо вырождается в прямую в случае совпадения фазы.

Для определения амплитуды гармоники частотой 50 Гц используем тот факт, что площадь ВАХ и реактивная мощность сдвига максимальны, что соответствует максимальному значению реактивной мощности при $\varphi'_k=\varphi_k\pm90°$. Амплитуда k-той составляющей сигнала найдется по формуле

$$A_{mk}=\frac{\frac{1}{2\pi}F_{BAX\max}}{\frac{1}{2}B_{mk}}$$

и будет равна 319,95 для приведенных в таблице значений.

4. Заключение

Полученная методика определения спектра многочастотного сигнала с помощью вольт-амперной характеристики является законченной и вполне работоспособной для широкого спектра сигналов. Все формулы методики легко трансформируются для обработки массивов цифровых отсчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
2. Функциональный контроль и диагностика электромеханических и электротехнических устройств и систем по цифровым отсчетам мгновенных значений токов и напряжений / Под ред. Е.И. Гольдштейна. – Томск: Печатная мануфактура, 2003. – 240 с.
3. Пат. на ПМ 41373 РФ. МПК^7 G01R 21/00. Устройство для измерения реактивной мощности сдвига в трехфазной трехпроводной цепи переменного тока / Е.И. Гольдштейн, А.О. Сулайманов. Заявлено 07.06.2004.
4. Пат. на ПМ 41158 РФ. МПК^7 G01R 25/00. Устройство для измерения коэффициента мощности в трехфазной трехпроводной цепи переменного тока / Е.И. Гольдштейн, А.О. Сулайманов. Заявлено 31.03.2004.
5. Пат. 2229725 РФ. МПК^7 G01R 23/16. Способ спектрального анализа периодического многочастотного сигнала / Е.И. Гольдштейн, Н.Л. Бацева. Заявлено 12.11.2002; Опубл. 27.05.2004; Бюл. № 15. – 11 с.: ил.

УДК 621.317.1